

## ЧАСТОТНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ СВІП-ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВІ ЗІГ-РЕЗОНАТОРА

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

Підвищення точності вимірювання частотних характеристик електронних пристроїв та ліній зв'язку є актуальною задачею. З метою її розв'язання для панорамних приладів надвисокочастотного діапазону розробляються свіп-генератори на основі ЗІГ-резонатора з покращеними метрологічними характеристиками.

В статті розглянуто новий підхід до створення свіп-генератора. Автогенератор на ЗІГ-резонаторі не охоплено зв'язками зворотного регулювання, а схему доповнено частотним перетворювачем з опорними генераторами. В результаті, компенсується похибка встановлення частоти свіп-генератора, що викликана нестабільністю параметрів ЗІГ-резонатора. Крім цього, вихідна напруга автогенератора має мінімальний рівень фазового шуму.

Запропоновано частотний перетворювач з діапазонним опорним генератором, частотний перетворювач на основі квадратора та частотний перетворювач свіп-генератора в режимі зупинки хитання. Пояснено принцип їх роботи, наведені часові діаграми та розрахункові вирази.

У свіп-генераторі з частотним перетворювачем, що містить діапазонний опорний генератор, додатково можливо, крім координатних міток на екрані монітора, формувати вимірювальну мітку з будь-якою частотою. Висока лінійність залежності частоти генерації ЗІГ-резонатора від струму керування дозволяє, використавши кусково-лінійну апроксимацію, отримувати інформацію про частоту в точці розташування курсора на екрані монітора.

Частотні перетворювачі на основі квадратора встановлюють у свіп-генератори, які працюють в режимах лінійної та нелінійної зміни частоти. Схему частотного перетворювача свіп-генератора в режимі зупинки хитання також побудовано на основі квадратора.

Мікроконтролером свіп-генератора із запропонованими перетворювачами частоти, корегується цифровий код керування автогенератором. Як наслідок, зростає точність визначення частоти, тобто зменшується похибка виміру різних частотних характеристик пристроїв та ліній зв'язку.

**Ключові слова:** частотна характеристика, панорамний прилад, свіп-генератор, ЗІГ-резонатор, частотний перетворювач, автогенератор, змішувач, опорний генератор, квадратор, мікроконтролер, код керування, хитання частоти.

### Вступ

Для спрощення визначення різних частотних характеристик пристроїв та ліній зв'язку в електронних системах широко використовуються панорамні прилади, основним складовим елементом яких є свіп-генератор. При цьому постає проблема керування параметрами свіп-генератора.

Свіп-генератори працюють в режимах хитання частоти і генерації фіксованої частоти, мають змінними такі основні параметри як мінімальна і максимальна частоти хитання, частотна смуга хитання і закон зміни частоти — лінійний або нелінійний. Зі зростанням робочої частоти свіп-генератора до десятків гігагерц точно встановлення цих параметрів виявляється достатньо складною задачею. Її вирішення стає можливим шляхом введення до свіп-генератора частотного перетворювача.

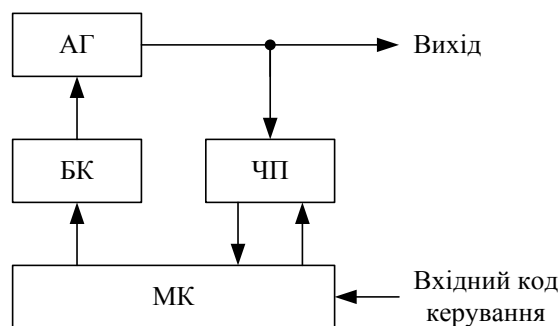


Рис. 1. Свіп-генератор

Свіп-генератор з частотним перетворювачем (рис. 1) складається з автогенератора (АГ) на ЗПГ-резонаторі та блоку керування (БК), який формує сигнал, що змінює частотні параметри вихідного коливання. До виходу генератора АГ приєднаний частотний перетворювач (ЧП).

Блоком БК і перетворювачем ЧП керує мікропроцесорний контролер (МК), вхідними сигналами якого є код встановлення параметрів свіп-генератора, а також послідовності імпульсів від перетворювача ЧП.

Генератор АГ працює в широкому діапазоні частот і може бути побудований за різними способами: на основі частотного синтезатора з петлею ФАПЧ або блоків прямого цифрового і аналогового синтезу. Безпосередньо в якості вузла генерації використовуються схеми на варикапах, керовані напругою, або ЗПГ-резонатори (залізо-ітрієвий гранат), керовані струмом [1], [2].

До переваг генератора на ЗПГ-резонаторах можна віднести велику кратність перебудови частоти (до декади), високу лінійність залежності частоти генерації від струму керування, низький рівень фазових шумів. Недоліком є низька температурна стабільність частоти вихідного коливання.

В [3] запропоновано свіп-генератор на ЗПГ-резонаторі з частотно-часовим перетворювачем ЧП на стробоскопічному змішувачі і двох або трьох високостабільних опорних генераторах. В цьому пристрої за визначеними співвідношеннями часових інтервалів між імпульсами з виходу перетворювача ЧП контролер МК формує такий сигнал керування від блоку БК, який компенсує похибку перетворення «струм—частота» генератора АГ в режимі лінійного хитання за пилкоподібним законом.

Завдяки введенню частотного перетворювача ЧП в свіп-генератор на ЗПГ-резонаторі [3] зменшується похибка встановлення мінімальної і максимальної частоти хитання та частотної смуги гойдання внаслідок температурної нестабільності та нелінійності розгортання.

Недоліками частотного перетворювача [3] є те, що він працює тільки в режимі лінійного хитання, не формує точний код керування від блоку БК для будь-якої частоти генерації, не призначений для встановлення у свіп-генератор з нелінійним законом зміни частоти або зупинкою хитання.

Метою статті є створення нових схемних рішень частотних перетворювачів, в яких усунути зазначені недоліки.

### Частотний перетворювач з діапазонним опорним генератором

У частотному перетворювачі з діапазонним опорним генератором [4] (рис. 2) додатково до функції перетворювача [3] введено формування точного сигналу керування від блоку БК для будь-якої частоти генерації та кусково-лінійна апроксимація для виведення на дисплей вузла відображення інформації (ВВІ) відомостей про частоту в точці розташування курсора.

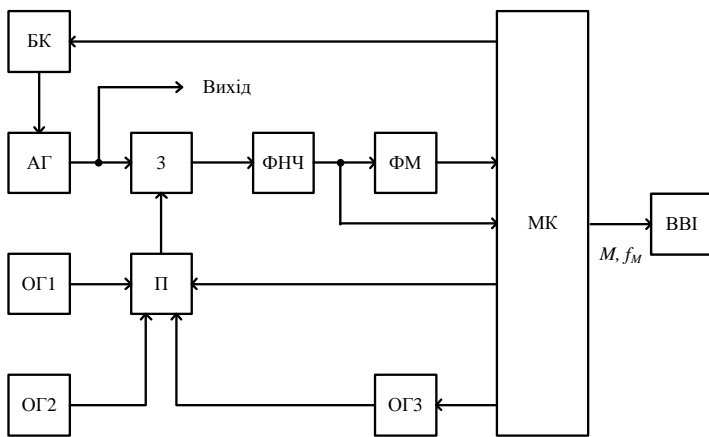


Рис. 2. Частотний перетворювач з діапазонним опорним генератором

Пилкоподібну напругу блок БК починає формувати з надходженням на його вхід імпульсів  $U_{МК}$  від контролера МК (рис. 3а). Частота  $f_{АГ}$  вихідної напруги генератора АГ, підключеного до першого входу змішувача (З), змінюється під час прямого ходу розгортки БК за лінійним законом (рис. 3б). На другий вхід змішувача З через ключ (К) подається напруга у вигляді коротких імпульсів з першого (ОГ1) або другого (ОГ2),

або третього (ОГ3) опорних генераторів. Гармоніки вихідної напруги опорних генераторів розподілені рівномірно у робочому діапазоні частот автогенератора з кроком  $f_1, f_2, f_3$ , відповідно.

Пилкоподібну напругу блок БК починає формувати з приходом на його вхід імпульсів  $U_{МК}$  від контролера МК (рис. 3а). Частота  $f_{АГ}$  вихідної напруги генератора АГ, підключеного до першого входу змішувача (З), змінюється під час прямого ходу розгортки БК за лінійним законом (рис. 3б). На другий вхід змішувача З через ключ (К) подається напруга у вигляді коротких імпульсів з першого (ОГ1) або другого (ОГ2), або третього (ОГ3) опорних генераторів. Гармоніки вихідної напруги опорних генераторів розподілені рівномірно у робочому діапазоні частот автогенератора з кроком  $f_1, f_2, f_3$ , відповідно.

Гармоніки вихідної напруги опорних генераторів розподілені рівномірно у робочому діапазоні частот автогенератора з кроком  $f_1, f_2, f_3$ , відповідно.

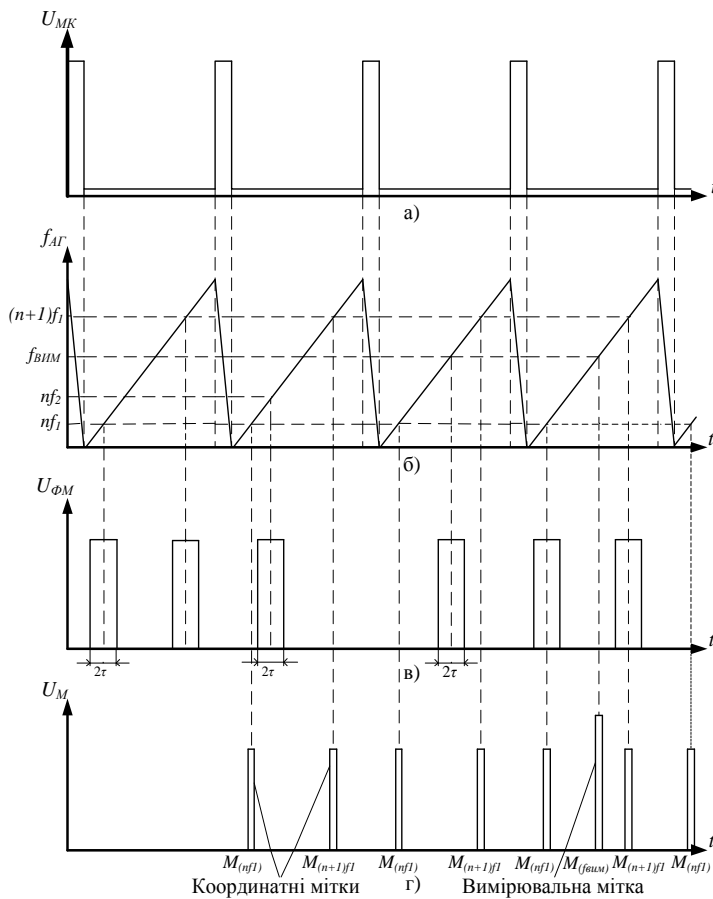


Рис. 3. Сигнали в перетворювачі з діапазонним опорним генератором

$f_2 = f_1 + F$ , де  $F = \frac{f_1}{n_{\text{МАКС}}} = \frac{f_{\text{МАКС}}}{n_{\text{МАКС}}^2}$  — частота зсуву;  $f_{\text{МАКС}}$  — максимальна частота генератора АГ,

$n_{\text{МАКС}}$  — максимальний номер гармоніки ОГ1.

Для нормальної роботи схеми (див. рис. 2) необхідно, щоб фільтра нижніх частот формувача ФМ мав смугу пропускання  $0,25F$ . Для уникнення впливу перехідних процесів у вузькосмуговому фільтрі на формування координатних, а пізніше і вимірювальної мітки треба правильно вибрати швидкість зміни частоти генератора АГ, іншими словами, період розгортання.

Перед формувачем ФМ встановлений ФНЧ зі смугою пропускання  $F = \frac{f_1 + F}{2}$ . На виході цього

фільтра виділяється напруга, частота якої змінюється в часі за трикутним законом. В момент появи координатної мітки частота на виході ФНЧ зменшується або збільшується в залежності від значення частоти генератора АГ.

При появі першої координатної мітки контролер МК визначає в двох послідовних часових інтервалах тривалістю  $\tau$  кількість квазіперіодів напруги з виходу ФНЧ  $S_1, S_2$  (рис. 3в). Розраховується частота АГ в момент появи першої координатної мітки за формулами  $f_{mn} = nf_1 = \frac{S_1 + S_2}{2\tau F} \cdot f_1$ , якщо

$S_1 > S_2$  і  $f_{mn} = nf_1 = \frac{f_1 + F - ((S_1 + S_2)/2\tau)}{F} f_1$ , якщо  $S_1 < S_2$ , де  $n$  — номер гармоніки генератора

ОГ1 з частотою  $f_1$ ,  $(S_1 + S_2)/2\tau$  — частота, яка відповідає середині часового інтервалу  $2\tau$ , визначається в МК. Номер гармоніки  $n$  в ході обчислень заокруглюється до найближчого цілого числа, тим самим підвищується точність визначення частоти координатних міток [4].

Контролер МК за відомим номером гармоніки  $n$  генератора ОГ1 визначає частоти всіх координатних міток в смугі хитання генератора АГ.

Під час третього періоду розгортання частоти АГ формується вимірювальна мітка (рис. 3в), яка

Вузлом ВВІ на екран дисплея виводиться інформація про частоту свіп-генератора, формується частотний масштаб, крок частотних міток, діапазон частот і таке інше

Під час першого періоду розгортання частоти АГ до змішувача 3 приєднаний генератор ОГ1 з частотою  $f_1$ . При цьому на виході змішувача 3 спостерігаються «нульові биття», за якими формувач міток (ФМ) створює на вході МК імпульси міток тривалістю  $2\tau$  з частотним кроком  $f_1$  (рис. 3в). Часове положення цих міток запам'ятовується в МК. Так в часі вузлом ВВІ формуються координатні мітки.

Назва «нульові биття» вказує на появу низькочастотної напруги на виході змішувача 3 з переходом її частоти через нуль в моменти часу, коли  $f_{AG} = if_1$ , де  $I = 1, 2, \dots, n, n + 1, \dots, n_{\text{МАКС}}$  — номер гармоніки генератора ОГ1. Ця низькочастотна напруга потрапляє на вхід формувача ФМ, який складається з послідовно з'єднаних фільтра нижніх частот, детектора і компаратора. На виході останнього з'являються імпульси міток.

Під час другого періоду розгортання частоти генератора АГ до змішувача 3 приєднаний генератор ОГ2 з частотою

відповідає довільній частоті  $f_{\text{ВІМ}}$  свіп-генератора в межах його робочого діапазону. Частота  $f_{\text{ВІМ}}$  визначається оператором, який працює з панорамним приладом. До змішувача З приєднується генератор ОГЗ, частота якого  $f_3$  задається кодом керування від МК. Генератор ОГЗ діапазонний і працює в межах від  $f_1$  до  $2f_1$ . Його частота знаходиться з виразу  $f_3 = f_1 + \frac{f_{\text{ВІМ}} - n_{\text{ВІМ}}f_1}{n_{\text{ВІМ}}}$ , де

$n_{\text{ВІМ}}$  — номер гармоніки генератора ОГ1, який відповідає частоті координатної мітки попередньої вимірювальної.

Генератор ОГЗ будується на основі частотного синтезатора з петлею ФАПЧ [1]. До його складу входять: кварцовий генератор, який визначає крок перебудови за частотою; фазовий детектор; фільтр нижніх частот, від якого залежить інерційність зміни частоти; генератор на варикапі, керований напругою; дільник частоти зі змінним коефіцієнтом ділення, який керується від контролера МК і визначає частоту генератора ОГЗ.

З четвертого і далі періоду розгортання частоти генератора АГ на виході МК для вузла ВВІ формуються короткі імпульси координатних і вимірювальної міток  $M$  (рис. 3г).

Алгоритм роботи свіп-генератора можна доповнити такою сервісною функцією: оператор панорамного приладу курсором на моніторі визначає в будь-якій точці отриманої характеристики частоту. Для цього, використаємо метод кусково-лінійної апроксимації. Якщо дві координатні мітки вважати опорними точками з координатами  $x_1, y_1$  і  $x_2, y_2$  прямої лінії, то її рівняння описується виразом  $y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x + \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{x_2 - x_1}$ .

Для випадку, що розглядається,  $y$  відповідає частоті  $f_{\text{АГ}}$ ,  $x_1$  відповідає частоті координатної мітки  $n f_1$ , а  $x_2 = (n + 1) f_1$ . Після перетворення отримаємо  $f = \frac{f_1}{x_2 - x_1} [x + n x_2 - (n + 1) x_1]$ , де  $x$  — координата курсора по осі частот;  $f$  — частота, яка відповідає положенню курсора на моніторі панорамного приладу.

### Частотний перетворювач на основі квадратора

Частотний перетворювач на основі квадратора [5] (рис. 4) у складі свіп-генератора на ЗГ-резонаторі працює як в режимі лінійної зміни частоти, але з великим коефіцієнтом нелінійності, так і в режимі нелінійної зміни в часі частоти автогенератора АГ. На рис. 5 зображені часові характеристики сигналів в окремих точках схеми перетворювача.

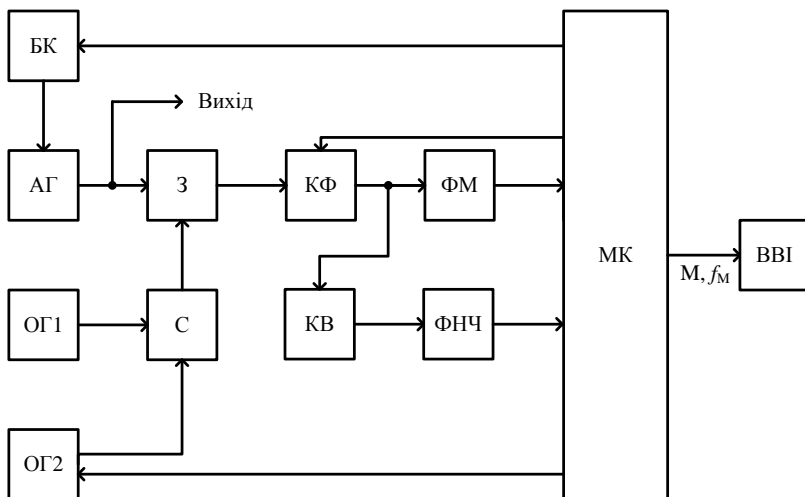


Рис. 4. Перетворювач частоти на основі квадратора

опорних генераторів розподілені рівномірно у робочому діапазоні частот свіп-генератора з кроком  $f_1, f_2$ , відповідно.

Під час другого періоду розгортання частоти генератора АГ до змішувача З приєднується, крім першого, ще другий генератор ОГ2 з частотою  $f_2$ . Контролер МК переводить керований фільтр (КФ) в режим зі смугою  $n_{\text{МАКС}}(f_2 - f_1) \dots \frac{f_1}{2} - n_{\text{МАКС}}(f_2 - f_1)$ . Після появи першої координатної

характеристики сигналів в окремих точках схеми перетворювача.

Пилкоподібну напругу блок BK починає формувати з приходом на його вхід імпульсів  $U_{\text{МК}}$  від контролера МК (рис. 5а). Під час прямого ходу напруги від BK частота  $f_{\text{АГ}}$  генератора АГ змінюється майже лінійно (рис. 5б). На другий вхід змішувача З через суматор (С) подається напруга у вигляді коротких імпульсів з першого ОГ1 або з першого ОГ1 і другого ОГ2 одночасно генераторів. Генератори мають близькі частоти  $f_1, f_2$ . Гармоніки вихідної напруги

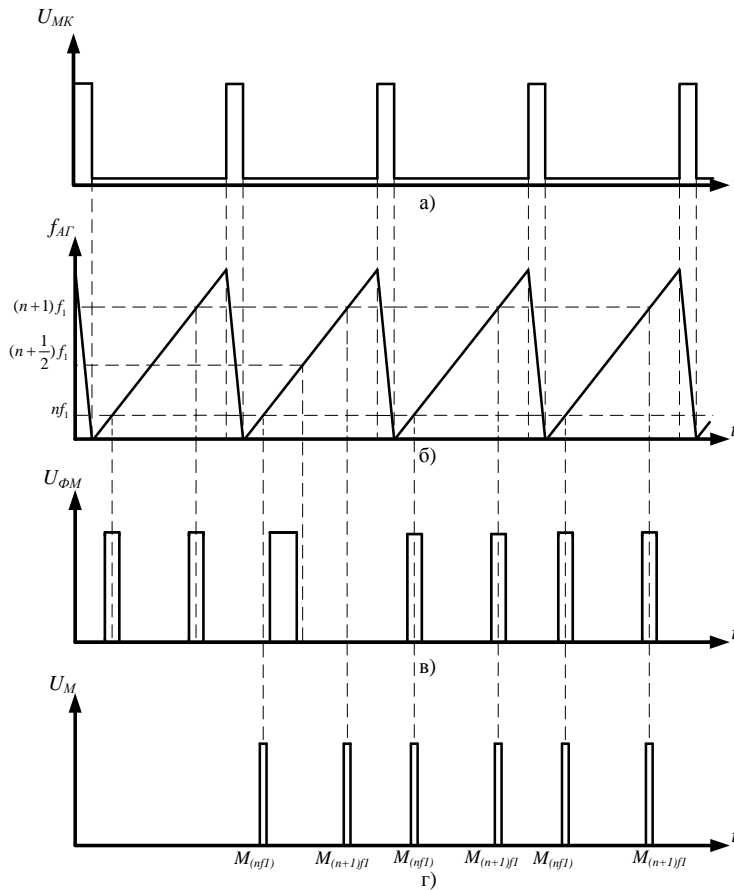


Рис. 5. Сигнали в перетворювачі на основі квадратора

тоти координатних міток. Це означає, що зміна частоти свіп-генератора в часі може бути як лінійною, так і нелінійною.

### Частотний перетворювач свіп-генератора в режимі зупинки хитання

На рис. 6 показаний частотний перетворювач свіп-генератора в режимі зупинки хитання.

Напрягу з частотою  $f$  від автогенератора подається на перший вхід першого змішувача (31). На його другий вхід через перший суматор (С1) подається напруга у вигляді коротких імпульсів з першого ОГ1 і другого ОГ2 опорних генераторів. Генератори мають близькі частоти  $f_1, f_2$ , причому

$$f_1 > f_2, \text{ а } f_1 - f_2 \ll \frac{f_1}{2n_{\text{МАКС}}}$$

Гармоніки вихідної напруги опорних генераторів розділені рівномірно у робочому діапазоні частот свіп-генератора з кроком  $f_1, f_2$ , відповідно.

На початку роботи контролер МК включає генератор ОГ1.

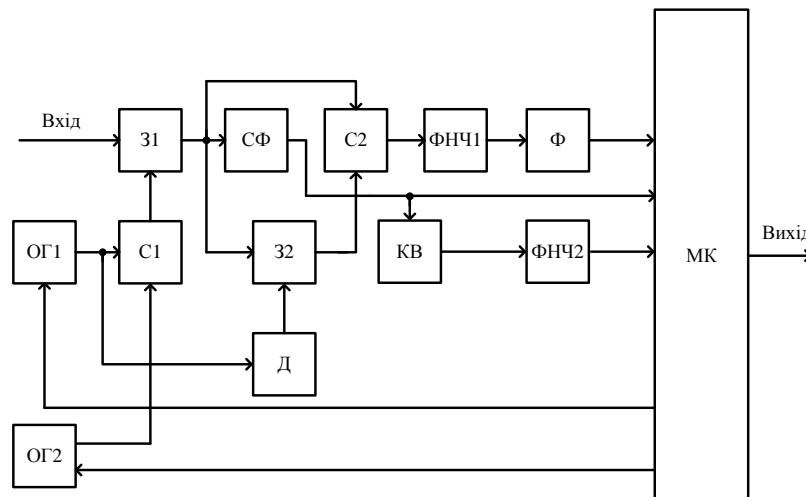


Рис. 6. Перетворювач частоти в режимі зупинки хитання

Якщо частота  $f$  на вході перетворювача знаходиться в межах

$$nf_1 - 2n_{\text{МАКС}}(f_1 - f_2) \dots nf_1 + 2n_{\text{МАКС}}(f_1 - f_2) \text{ або}$$

$$nf_1 - \left[ \frac{f_1}{2} + 2n_{\text{МАКС}}(f_1 - f_2) \right] \dots nf_1 - \left[ \frac{f_1}{2} - 2n_{\text{МАКС}}(f_1 - f_2) \right],$$

де  $n = 1, 2, \dots, n_{\text{МАКС}}$  — номер гармоніки,  $n_{\text{МАКС}}$  — максимальний номер гармоніки, на виході формувача (Ф) з'являється напруга одиничного рівня. Це пояснюється тим, що продукти перетворення з різницевиими частотами від змішувача З1, а також другого змішувача (З2) з опорною напругою частотою  $f_1/2$  від дільника частоти (Д) на два додаються другим суматором (С2) і виділяються першим фільтром низьких частот (ФНЧ1) зі смугою пропускання  $2n_{\text{МАКС}}(f_1 - f_2)$ .

Для правильного визначення частоти  $f$  необхідно, щоб напруга на виході формувача Ф була нульового рівня. Це досягається зміною контролером МК частоти  $f_1$  генератора ОГ1. Зміна від початкової частоти  $f_1$  може не відбуватись, якщо частота  $f$  не попадає в зазначені вище межі.

Після появи напруги нульового рівня на виході формувача Ф контролер МК визначає частоту  $F_1$  на виході смугового фільтра (СФ) зі смугою пропускання  $n_{\text{МАКС}}(f_1 - f_2) \dots \frac{f_1}{2} - n_{\text{МАКС}}(f_2 - f_1)$ .

Контролер МК вмикає генератор ОГ2, після чого визначає частоту  $F$  напруги на виході другого фільтра нижніх частот (ФНЧ2) зі смугою пропускання  $n_{\text{МАКС}}(f_1 - f_2)$  і частоту  $F_2$  напруги на виході фільтра СФ.

Частота  $f$  свіп-генератора в режимі зупинки хитання знаходиться з виразів:

$$f = \text{round}\left(\frac{F}{f_1 - f_2}\right)f_1 + F_1, \text{ якщо } F_2 > F_1 \text{ або } f = \text{round}\left(\frac{F}{f_1 - f_2}\right)f_1 - F_1, \text{ якщо } F_2 < F_1.$$

Похибка вимірювання частоти свіп-генератора в режимі зупинки хитання зменшується, оскільки частоти  $f_1, f_2$  задаються високостабільними генераторами, наприклад кварцовими. Крім того, операція заокруглення до найближчого цілого значення компенсує можливу похибку визначення частоти  $F$ , а частота  $F_1 \ll f$ .

## Висновки

Запропоновано нові схемні рішення частотних перетворювачів для свіп-генератора на основі ЗІГ-резонатора. Подані часові діаграми і пояснено принцип їхньої роботи.

У частотному перетворювачі з діапазонним опорним генератором формуються координатні мітки з відомими частотним кроком і абсолютною частотою. Крім координатних міток на екрані монітора оператором може бути сформована вимірювальна мітка з будь-якою частотою, точність встановлення якої залежить від малого кроку, меншого 1 кГц, зміни частоти діапазонного генератора. В результаті, похибка визначення частоти буде такою або меншою, як і в кращих зразках свіп-генераторів, наприклад, (0,1...0,5) % в серійному приладі Р4-МВМ-20 виробництва фірми MWM LAB (Білорусь). Висока лінійність залежності частоти генерації ЗІГ-резонатора від струму керування дозволяє, використавши кусково-лінійну апроксимацію, отримувати інформацію про частоту в точці розташування курсора на екрані монітора.

Відмінністю запропонованих перетворювачів на основі квадратора є те, що опорним коливанням для вхідного змішувача є сума двох високостабільних гармонічних напруг з близькими частотами. Продукт перетворення фільтрується і обробляється квадратором з виділенням складової з частотою, кратною різниці опорних частот. За цією частотою визначається частота свіп-генератора в режимах хитання або фіксованої генерації. На результат частотних вимірювань не впливає нелінійність хитання.

Відносна частотна нестабільність опорних генераторів на кварцових резонаторах  $10^{-6}$  і краще, що входять до складу розглянутих перетворювачів, забезпечує високу точність визначення частоти свіп-генератора на ЗІГ-резонаторі, температурна нестабільність якого впливає тільки на часове положення міток на екрані монітора.

Автогенератор на ЗІГ-резонаторі, що входить до складу свіп-генератора, не охоплено зворотними зв'язками додаткових регулювань. Він керується лише цифровим кодом від контролера. В результаті, вихідна напруга свіп-генератора має мінімальний рівень фазового шуму.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Н. П. Кандырин, «ГУН или ЖИГ? Выбор генераторов при проектировании СВЧ синтезаторов с ФАПЧ,» *Системи обробки інформації*, № 8 (133), с. 25-30, 2015.
- [2] В. Кувшинов, и А. Майстренко, «ЖИГ генераторы и синтезаторы частот компании Micro Lambda Wireless,» *Компоненты и технологии*, № 9, с. 34-38, 2015.
- [3] С. П. Кононов, та В. Д. Росохай, «Вимірювання частоти міток у пристроях на основі свіп-генератора,» *Наукові праці ВНТУ*, № 4, с. 1-9, 2010. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/issue/archive>. Дата звернення: Трав. 20, 2019.
- [4] С. П. Кононов, та М. А. Григоренко, «Вимірювач частоти свіп-генератора,» *Патент України G01R 23/00. № 120287 МПК(2017)*, 25.10.2017.
- [5] С. П. Кононов, та А. А. Негур, «Вимірювач частоти свіп-генератора,» *Патент України G01R 23/00. № 132987 МПК(2018)*, 25.03.2019.

Рекомендована кафедрою телекомунікаційних систем та телебачення ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 30.07.2019

**Кононов Сергій Павлович** — канд. техн. наук, доцент кафедри телекомунікаційних систем та телебачення, e-mail: [knnvknnv@ukr.net](mailto:knnvknnv@ukr.net) ;

**Білик Олександр Борисович** — аспірант кафедри телекомунікаційних систем та телебачення, e-mail: [vdvsasha2@gmail.com](mailto:vdvsasha2@gmail.com) .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**S. P. Kononov<sup>1</sup>**  
**O. B. Bilyk<sup>1</sup>**

## Frequency Converters of Sweep Generator Based on YIG Resonator

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*Improving the accuracy of measuring the frequency characteristics of electronic devices and communication lines is an important task. In order to solve it for panoramic microwave devices, sweep-generators based on a YIG resonator with improved metrological characteristics are being developed.*

*The article describes a new approach to creating a sweep generator. The self-oscillator at the YIG resonator is not covered by reverse control connections, and the circuit is supplemented with a frequency converter with reference oscillators. As a result, the error of setting the frequency of the sweep generator, which is caused by the instability of the parameters of the YIG resonator, is compensated. In addition, the output voltage of the oscillator has a minimum level of phase noise.*

*A frequency converter with a range reference oscillator, a frequency converter based on a quad and a frequency converter of a sweep generator in the swing stop mode are proposed. The principle of their work is explained, temporary waveforms and calculated expressions are given.*

*In a sweep generator with a frequency converter containing a range reference generator, it is additionally possible, in addition to the coordinate marks on the monitor screen, to form a measuring mark with any frequency. The high linearity of the dependence of the generation frequency of the YIG resonator on the control current makes it possible, using a piecewise linear approximation, to obtain information about the frequency at the cursor location on the monitor screen.*

*Quad-based frequency converters are installed in sweep-generators operating in linear and non-linear frequency change modes. The scheme of the frequency converter of the sweep-generator in the swing-out mode is also constructed on the basis of a quad.*

*The microcontroller of the sweep-generator with installed frequency converters adjusts the digital control code of the oscillator. As a result, the accuracy of determining the frequency increases i.e. decreases the measurement error of various frequency characteristics of devices and communication lines.*

**Keywords:** frequency response, panoramic device, sweep-generator, YIG resonator, frequency converter, auto-oscillator, mixer, reference oscillator, quad, microcontroller, control code, frequency sweep.

**Kononov Serhii P.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Telecommunication Systems and Television, e-mail: [knnvknnv@ukr.net](mailto:knnvknnv@ukr.net) ;

**Bilyk Oleksandr B.** — Post-Graduate Student of the Chair of Telecommunication Systems and Television, e-mail: [vdvsasha2@gmail.com](mailto:vdvsasha2@gmail.com)

С. П. Кононов<sup>1</sup>  
А. Б. Билык<sup>1</sup>

## Частотные преобразователи свип-генератора на основе ЖИГ-резонатора

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Повышение точности измерения частотных характеристик электронных устройств и линий связи является актуальной задачей. С целью ее решения для панорамных приборов СВЧ диапазона разрабатываются свип-генераторы на основе ЖИГ-резонатора с улучшенными метрологическими характеристиками.*

*В статье рассмотрен новый подход к созданию свип-генератора. Автогенератор на ЖИГ-резонаторе не охвачен связями обратного регулирования, а схема дополнена частотным преобразователем с опорными генераторами. В результате, компенсируется погрешность установки частоты свип-генератора, вызванная нестабильностью параметров ЖИГ-резонатора. Кроме этого, выходное напряжение автогенератора имеет минимальный уровень фазового шума.*

*Предложены частотный преобразователь с диапазонным опорным генератором, частотный преобразователь на основе квадратора и частотный преобразователь свип-генератора в режиме останова качания. Объяснен принцип их работы, приведены временные диаграммы и расчетные выражения.*

*В свип-генераторе с частотным преобразователем, содержащем диапазонный опорный генератор, дополнительно возможно кроме координатных меток на экране монитора формировать измерительную метку с любой частотой. Высокая линейность зависимости частоты генерации ЖИГ-резонатора от тока управления позволяет, используя кусочно-линейную аппроксимацию, получать информацию о частоте в точке расположения курсора на экране монитора.*

*Частотные преобразователи на основе квадратора устанавливаются в свип-генераторы, работающие в режимах линейного и нелинейного изменения частоты. Схема частотного преобразователя свип-генератора в режиме останова качания также построена на основе квадратора.*

*Микроконтроллером свип-генератора с установленными частотными преобразователями корректируется цифровой код управления автогенератором. Как следствие, возрастает точность определения частоты, т.е. уменьшается погрешность измерения различных частотных характеристик устройств и линий связи.*

**Ключевые слова:** частотная характеристика, панорамный прибор, свип-генератор, ЖИГ-резонатор, частотный преобразователь, автогенератор, смеситель, опорный генератор, квадратор, микроконтроллер, код управления, качание частоты.

**Кононов Сергей Павлович** — канд. техн. наук, доцент кафедры телекоммуникационных систем и телевидения, e-mail: knnvknnv@ukr.net ;

**Билык Александр Борисович** — аспирант кафедры телекоммуникационных систем и телевидения, e-mail: vdvsasha2@gmail.com